

## BAB III

### LANDASAN TEORI

#### 3.1 Umum

Dalam bahasa sehari-hari pengertian tentang besi dan baja sering tertukar. Perkataan besi dalam segi teknik khususnya hampir digunakan untuk menyatakan sebuah unsur Ferrum (Fe) yang berupa besi murni. Besi murni hampir tidak pernah dipakai. Biasanya suatu logam dikotori dengan karbon dan unsur-unsur lain, terutama unsur karbon (C) sangat mempengaruhi perilaku dari besi. Kadar karbon dipakai juga sebagai petunjuk untuk membedakan antara besi tuang dan baja.

- besi dengan kadar karbon  $\geq 2\%$  dinamakan besi tuang
- besi dengan kadar karbon  $< 2\%$  dinamakan baja

Besi tuang pada umumnya getas dan mempunyai titik lebur yang lebih rendah (sekitar  $1150^{\circ}\text{C}$ , kadar karbon  $4\%$ )

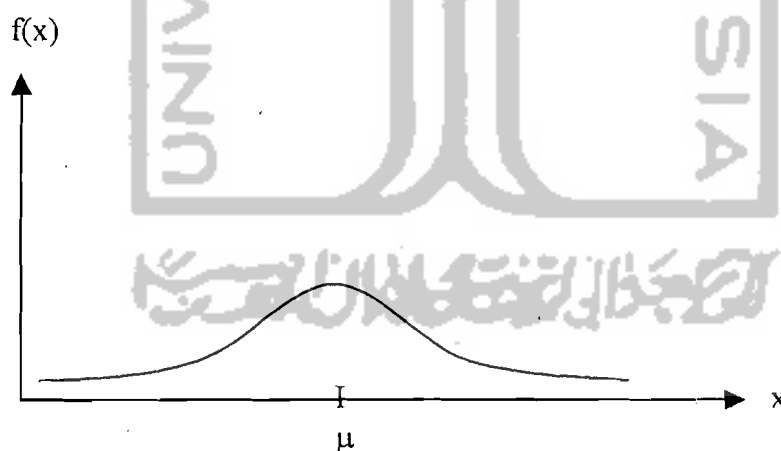
Pabrikasi baja beton dapat diskemakan sebagai berikut :

1. Bijih besi  
↓-----proses tanur tinggi "hoogoven"
2. Besi kasar (mentah) dan/atau serpih besi tua "Schrot"  
↓-----pabrikasi baja
3. Baja  
↓-----proses penggilasan
4. Baja beton

## 3.2 Teori Distribusi

### 3.2.1 Distribusi Normal

Distribusi Normal pertama kali dipelajari dalam abad delapan belas ketika model “error” (kesalahan) pengukuran yang telah diobservasi mengikuti secara simetris, distribusi berbentuk lonceng. Hal ini pertama kali disajikan secara matematik pada tahun 1733 oleh DeMoivre, yang diperoleh sebagai sebuah bentuk batasan distribusi binomial. Distribusi tersebut juga diperkenalkan oleh Laplace pada tahun 1775. Meskipun menurut sejarah error, hal ini telah diberi tanda untuk Gauss, yang dipublikasi pertama muncul tahun 1809, dan istilah distribusi Gauss seringkali digunakan. Berbagai usaha telah dilakukan selama abad delapan belas dan sembilan belas untuk menentukan distribusi ini sebagai dasar hukum probabilitas untuk seluruh jenis kontinu, maka nama “normal” menjadi dapat digunakan. Lihat gambar 3.1



Gambar 3.1 Distribusi Normal

Distribusi normal mempunyai fungsi kerapatan probabilitas (PDF) sbb:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left\{ \frac{x-\mu}{\sigma} \right\}^2} \quad -\infty < x < \infty \quad (3.1)$$

dimana  $\mu$  dan  $\sigma$  adalah parameter distribusi, yang masing-masing merupakan nilai rerata (mean value) dan deviasi standar dari varian ( $\sigma^2$ ). Kita akan menggunakan notasi yang singkat  $N(\mu, \sigma^2)$ .

### 3.2.2 Distribusi Lognormal

Distribusi lognormal dalam bentuk sangat sederhana adalah fungsi densitas sebuah variabel yang logaritmanya mengikuti hukum distribusi normal. Rata-rata dan variannya adalah :

$$E(Y) = \mu y \quad (3.2)$$

$$V(Y) = \sigma^2 y \quad (3.3)$$

dimana  $R_x = (x : 0 < x < \infty)$  dan  $Y = \log_e X$

### 3.2.3 Distribusi Kontinu Penting

Ada beberapa distribusi kontinu yang lainnya seperti distribusi Uniform, Eksponensial, Gamma, Weibull, Normal Dua Variabel.

Dari beberapa distribusi probabilitas yang paling terkenal dan umum dipakai adalah distribusi normal/Gauss.

## 3.3 Tegangan-Regangan Baja Beton

Tegangan adalah beban aksial dibagi dengan luas penampang batang semula, sebelum beban bekerja, atau dapat dirumuskan :

$$\sigma = P / A \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (3.4)$$

Regangan adalah perubahan panjang batang akibat beban dibagi panjang batang semula sebelum beban bekerja, atau dapat dirumuskan :

$$\varepsilon = \Delta L / L_0 \quad (\text{tanpa satuan}) \quad (3.5)$$

Hubungan linier tegangan-regangan dikenal dengan nama Hukum Hooke, karena dinyatakan pertama kali oleh Robert Hooke pada tahun 1676.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.6)$$

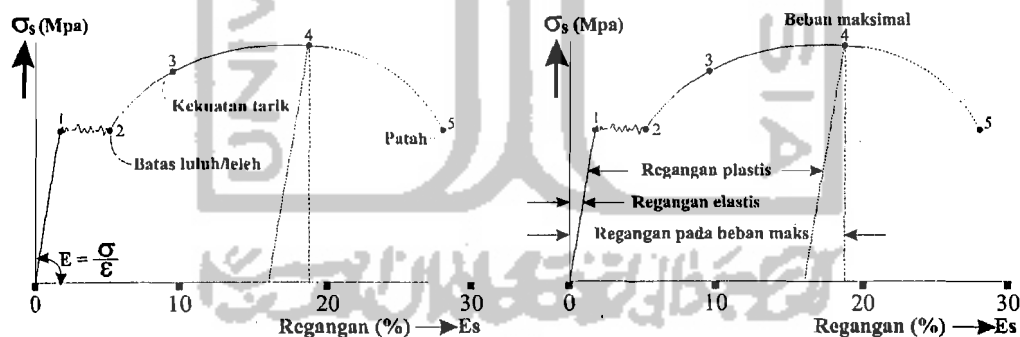
dimana :  $\sigma$  = tegangan ( $\text{kg/cm}^2$ )

$\varepsilon$  = regangan

$E$  = modulus elastisitas ( $\text{kg/cm}^2$ )

= yaitu suatu konstanta yang besarnya tergantung bahannya.

$$E \text{ baja} = 2,1 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$$



Gambar 3.2 Diagram tegangan-regangan

Keterangan :

0-1 daerah elastis

1-2 daerah dimana- (besar tegangan hampir tidak berubah)-terjadi plastis deformasi yang besar (meluluh)

2-3 di daerah ini, untuk memperbesar regangan dibutuhkan penambahan tegangan (daerah penguatan)

- 3-4 daerah di mana regangan membesar sampai 15%-20% tanpa memberi penambahan tegangan yang berarti.
- 4-5 terjadi penyempitan (kontraksi)- perubahan bentuk setempat yang besar- dimana suatu penampang batang mengecil sedemikian, sehingga batang akan patah di tempat ini.

Adapun sifat bahan yang penting yang dapat dilihat di dalam diagram tegangan-regangan adalah :

a. Modulus elastisitas

Nilai modulus elastisitas ditunjukkan berupa sudut kemiringan diagram terhadap sumbu horisontal (sumbu regangan). Besarnya sama dengan tangen sudut kemiringan tersebut. Besar modulus elastisitas tetap dari tegangan nol sampai suatu tegangan tertentu (ditandai dengan diagram yang masih berupa garis lurus), atau dapat ditulis :

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (3.7)$$

Menurut W.F. Chen dan T. Atsuta dalam bukunya Theory of Beam Columns disebutkan bahwa modulus plastis daerah yield plateau ( $E_2$  atau  $E_t$ ) adalah  $E_t = 1/25 E_1$  (modulus elastisitas daerah elastis).

b. Batas Sebanding

Batas sebanding (batas proporsional) yaitu suatu nilai tegangan tertinggi yang masih berada di garis lurus (pada ujung atas diagram yang masih mengikuti hukum Hooke).

c. Batas Elastis

Batas elastis yaitu tegangan tertinggi yang masih dapat ditahan oleh bahan dengan elastis yaitu apabila tegangan yang bekerja itu dihilangkan bahan masih dapat kembali ke tempat semula. Biasanya besar tegangan pada batas elastis ini sedikit lebih besar daripada batas sebanding, jadi sudah sedikit masuk pada garis lengkung diatas batas sebanding.

d. Batas Luluh/Titik leleh

Batas leleh (yield point) atau tegangan leleh yaitu tegangan yang sedikit di atas batas elastis yang tampak terjadinya penambahan regangan tanpa adanya tambahan (pada batas atas) tegangan. Batas atas titik leleh ini hanya akan tampak bila pengujian dilakukan dengan sangat hati-hati dan beban betul-betul bekerja secara sentris pada benda ujinya.

e. Kuat leleh

Kuat leleh dipakai untuk menjadi ukuran maksimum tegangan yang masih dapat dipakai (tanpa perubahan bentuk yang berarti) pada bahan yang tidak mempunyai titik leleh dengan jelas. Kuat leleh ini diperoleh dengan cara menarik garis sejajar dengan garis elastis dan dimulai dari titik regangan sebesar 0,2 persen pada sumbu horisontal (sumbu regangan) sehingga memotong diagram tegangan-regangan. Titik potong dengan diagram itu ditetapkan sebagai nilai tegangan kuat leleh.

f. Kuat tarik ("tensile strenght")

Kuat tarik yaitu tegangan maksimum yang dicapai selama bahan diuji tarik. Istilah ini sering pula disebut kuat ultimit (ultimate strenght), atau dapat ditulis :

$$\text{Kuat tarik} = \text{beban maksimum} / A_o \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (3.8)$$

g. Tegangan patah (“fracture”)

Tegangan patah yaitu tegangan pada saat bahan patah. Biasanya sebelum patah beban mengecil terlebih dahulu akibat adanya pengecilan penampang bahannya.

Tegangan-tegangan yang diijinkan :

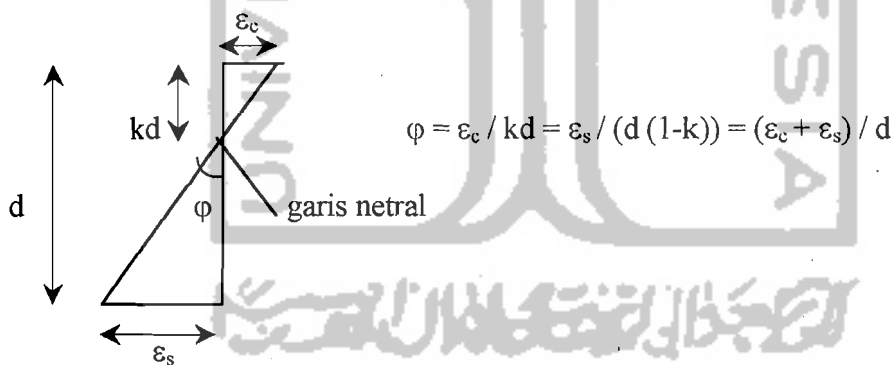
$$\text{- pembebanan tetap} = 0,58.f_y \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (3.9)$$

$$\text{- pembebanan sementara} = 0,83.f_y \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (3.10)$$

$$\text{- pembebanan rencana} = 0,87.f_y \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (3.11)$$

### 3.4 Momen-Curvature

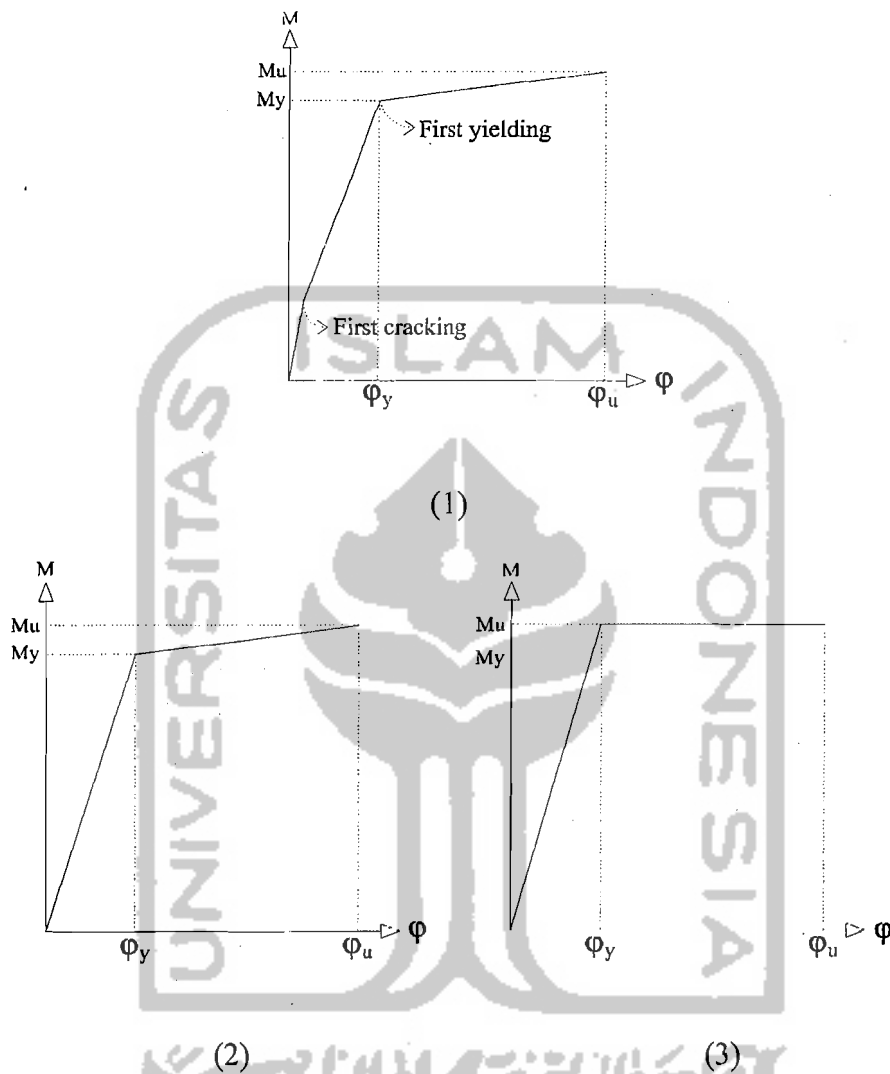
Momen-curvature  $\phi$  menurut Park and Paulay dengan meninjau tampang elemen adalah :



$$\phi = \epsilon_c / kd = \epsilon_s / (d(1-k)) = (\epsilon_c + \epsilon_s) / d \quad (3.12)$$

Gambar 3.3 Tampang elemen distribusi regangan

Momen-curvature dengan tulangan sebelah (tarik saja) di dalam analisis sering diidealisasikan, ada tiga macam idealisasi menurut Park & Paulay (lihat gambar 3.4).



Gambar 3.4 Momen Curvature

Suatu penampang balok persegi tulangan rangkap saat luluh pertama dan saat ultimit mempunyai bentuk diagram tegangan regangan yang berbeda seperti terlihat pada gambar 3.5.



Untuk perhitungan momen-curvature, terlebih dahulu diketahui dimensi unsur-unsur penampang balok yang terdiri dari : jumlah dan ukuran tulangan baja tarik dan tekan ( $A_s$  dan  $A_s'$ ), lebar balok ( $b$ ), tinggi efektif dari tepi atas balok ke baja tarik ( $d$ ), tinggi efektif dari tepi atas balok ke baja tekan ( $d'$ ), tinggi total ( $h$ ), mutu beton ( $f_c'$ ), modulus hancur beton ( $f_r$ ), modulus elastisitas beton ( $E_c$ ), mutu baja ( $f_y$ ), modulus elastisitas baja ( $E_s$ ). Adapun persamaan yang dipakai untuk proses mencari momen-curvature adalah sebagai berikut :

- Sebelum retak

$$\rho = A_s/bd \quad (3.13)$$

$$\rho' = A_s'/bd \quad (3.14)$$

$$\text{rasio modulus } n = E_s/E_c \quad (3.15)$$

$$A = bh + (n-1)(A_s + A_s') \quad (3.16)$$

Mencari letak garis netral

$$y = \frac{(bh \times 1/2h) + ((n-1)A_s \times d) + ((n-1)A_s' \times d')}{A} \quad (3.17)$$

$$I = (1/12 \times b \times h^3) + (bh \times y_1^2) + ((n-1)A_s \times (y_2^2)) + ((n-1)A_s' \times (y_3^2)) \quad (3.18)$$

dimana :  $y_1$  = jarak pusat berat penampang beton ke garis netral

$y_2$  = jarak pusat berat tulangan tarik ke garis netral

$y_3$  = jarak pusat berat tulangan tekan ke garis netral

$$M_{cr} = (f_r I) / y_{\text{bawah}} \text{ (jarak serat tarik terluar ke garis netral)} \quad (3.19)$$

$$\phi_{cr} = (f_r / E_c) / y_{\text{bawah}} \quad (3.20)$$

- Setelah retak, saat leleh pertama

$$k = \left\{ (\rho + \rho')^2 n^2 + 2 \left( \rho + \frac{\rho' d'}{d} \right) n \right\}^{0.5} - (\rho + \rho') n \quad (3.21)$$

$$\epsilon_s = f_y / E_s \quad (3.22)$$

$$\epsilon_c = \epsilon_s \frac{kd}{d - kd} \quad (3.23)$$

$$f_c = \epsilon_c E_c \quad (3.24)$$

$$\epsilon_s' = \epsilon_c \frac{kd - d'}{kd} \quad (3.25)$$

$$f_s' = kd E_s \quad (3.26)$$

$$C_c = 0.5 f_c b kd \quad (3.27)$$

$$C_s = A_s' f_s' \quad (3.28)$$

$$\text{Total gaya (F)} = C_c + C_s \quad (3.29)$$

Mencari pusat berat blok segitiga regangan daerah tekan

$$y = \frac{(C_s \times d') + (C_c \times (kd/3))}{F} \quad (3.30)$$

$$c = d - y \quad (3.31)$$

$$M_y = A_s f_y c \quad (3.32)$$

$$\phi_y = \frac{f_y / E_s}{d(1-k)} = \frac{\epsilon_s}{d - kd} \quad (3.33)$$

- Setelah retak, saat ultimit

$$a = \frac{f_y (A_s - A_s')}{0.85 f_c' b} \quad (3.34)$$

$$c = a / 0.85 \quad (3.35)$$

$$\epsilon_{s'} = \epsilon_c \frac{(c-d')}{c} < \epsilon_s \rightarrow \text{baja belum leleh} \quad (3.36)$$

$$Mu = 0.85 f_c' a b (d-0.5a) + A_s' f_y (d-d') \quad (3.37)$$

$$\phi_u = \epsilon_c / c \quad (3.38)$$

$$\epsilon_{s'} = \epsilon_c \frac{(c-d')}{c} > \epsilon_s \rightarrow \text{baja sudah leleh} \quad (3.39)$$

maka dilakukan trial dan asumsikan untuk  $f_s'$

$$a = \frac{(A_s f_y) - (A_s' f_s')}{0.85 f_c' b} \quad (3.40)$$

$$c = a / 0.85 \quad (3.41)$$

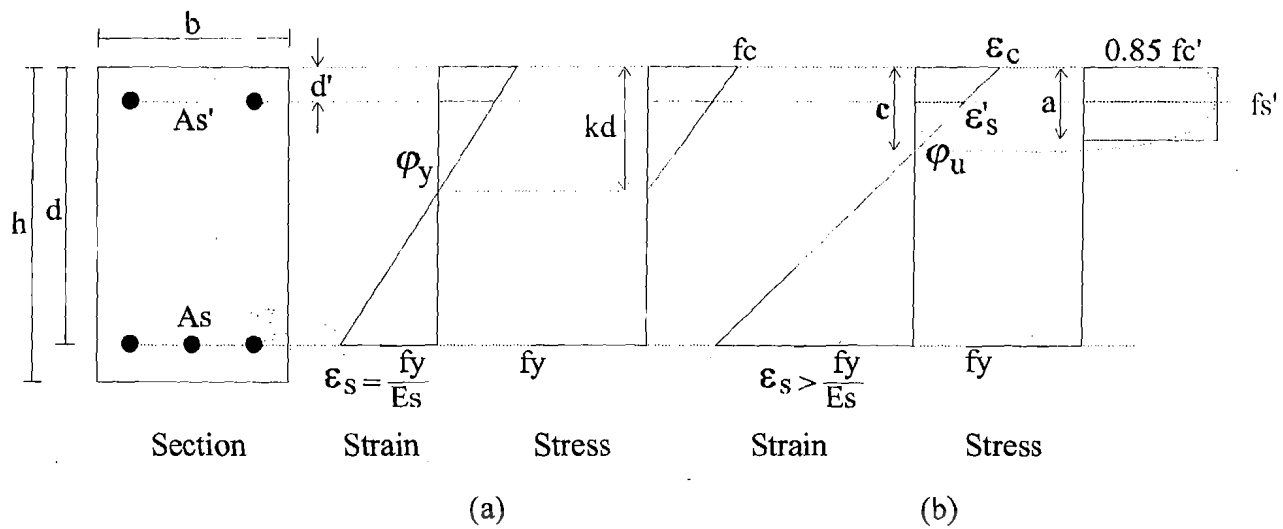
$$\epsilon_{s'} = \epsilon_c \frac{(c-d')}{c} \quad (3.42)$$

$$f_s' = \epsilon_{s'} E_s \quad (3.43)$$

$$Mu = 0.85 f_c' a b (d-0.5a) + A_s' f_s' (d-d') \quad (3.44)$$

$$\phi_u = \epsilon_c / c \quad (3.45)$$





Gambar 3.5 Tampang balok tulangan rangkap (a) saat luluh pertama (b) saat ultimit

### 3.5 Overstrenght Factor

#### 3.5.1 Balok Persegi Tulangan Sebelah

Analisis penampang balok terlentur dilakukan dengan terlebih dahulu mengetahui dimensi unsur-unsur penampang balok yang terdiri dari : jumlah dan ukuran tulangan baja tarik ( $A_s$ ), lebar balok ( $b$ ), tinggi efektif ( $d$ ), tinggi total ( $h$ ), mutu beton ( $f_c'$ ), dan mutu baja ( $f_y$ ), sedangkan yang dicari adalah:

$$\text{Rasio tulangan } (\rho) = A_s/b.d \quad (3.46)$$

$$\rho_{\text{mak}} = 0.75 \rho_b + \frac{f_s'}{f_y} \rho' \quad (3.47)$$

$$\rho_{\text{min}} = 1.4/f_y \quad (3.48)$$

$$\rho_b = \frac{0.85 f_c'}{f_y} \beta_1 \left( \frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (3.49)$$

dimana :  $\beta_1 = 0.85$  untuk  $f_c' \leq 30$  Mpa

$\beta_1 = 0.85 - 0.008 (f_c' - 30)$  untuk  $f_c' > 30$  Mpa dan  $\beta_1$  tidak boleh  $< 0.65$

- Untuk kondisi I

$$c_1 = \frac{A_s f_y}{0.85 f_c' b \beta_1} \quad (3.50)$$

$$M_{n1} = 0.85 f_c' b \beta_1 c_1 (d - 0.5 \beta_1 c_1) \quad (3.51)$$

- Untuk kondisi II

$$c_2 = \frac{A_s \{ f_y + (\epsilon_u - \epsilon_{sh}) E_{sh} \}}{0.85 f_c' b \beta_1} \quad (3.52)$$

$$M_{n2} = 0.85 f_c' b \beta_1 c_2 (d - 0.5 \beta_1 c_2) \quad (3.53)$$

$$OV_{FM} = M_{n2}/M_{n1} \quad (3.54)$$

### 3.5.2 Balok Persegi Tulangan Rangkap

Analisis penampang balok terlentur dilakukan dengan terlebih dahulu mengetahui dimensi unsur-unsur penampang balok yang terdiri dari : jumlah dan ukuran tulangan baja tarik dan desak ( $A_s$  dan  $A_s'$ ), lebar balok ( $b$ ), tinggi efektif dari tepi atas balok ke baja tarik ( $d$ ), tinggi efektif dari tepi atas balok ke baja tekan ( $d'$ ), tinggi total ( $h$ ), mutu beton ( $f_c'$ ), dan mutu baja ( $f_y$ ), sedangkan yang dicari adalah:

$$\text{Rasio tulangan } (\rho) = A_s/b.d \quad (3.55)$$

$$\rho_{\text{mak}} = 0.75 \rho_b + \frac{f_s'}{f_y} \rho' \quad (3.56)$$

$$\rho_{\text{min}} = 1.4/f_y \quad (3.57)$$

$$\rho_b = \frac{0.85 f_c'}{f_y} \beta_1 \left( \frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (3.58)$$

dimana :  $\beta_1 = 0.85$  untuk  $f_c' \leq 30$  Mpa

$\beta_1 = 0.85 - 0.008 (f_c' - 30)$  untuk  $f_c' > 30$  Mpa dan  $\beta_1$  tidak boleh  $< 0.65$

Cek penulangan Under Reinforced

$$\rho < \rho_{\text{mak}} = 0.75 \rho_b + \frac{f_s'}{f_y} \rho' \quad (3.59)$$

$$\text{Cek tegangan baja tekan : } f_s' = 600 \left\{ 1 - \frac{0.85 f_c'}{(\rho - \rho') \cdot f_y} \beta_1 \frac{d}{d'} \right\} \leq f_y \quad (3.60)$$

- bila baja tekan leleh, maka diambil  $f_s' = f_y$

$$A_{s1} = A_s - A_{s'} \quad (3.61)$$

- Untuk kondisi I

$$c1 = \frac{A_{s1} f_y}{0.85 f_c' b \beta_1} \quad (3.62)$$

- Untuk kondisi II

$$c2 = \frac{A_{s1} \{ f_y + (\epsilon_u - \epsilon_{sh}) E_{sh} \}}{0.85 f_c' b \beta_1} \quad (3.63)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{n1} &= A_{s1} f_y (d - 0.5 \beta_1 c1) \\ M_{n2} &= A_{s'} f_y (d - d') \end{aligned} \right\} M_{nI} = M_{n1} + M_{n2} \quad (3.64)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{n1} &= A_{s1} \{ f_y + (\epsilon_u - \epsilon_{sh}) E_{sh} \} (d - 0.5 \beta_1 c1) \\ M_{n2} &= A_{s'} \{ f_y + (\epsilon_u - \epsilon_{sh}) E_{sh} \} (d - d') \end{aligned} \right\} M_{nII} = M_{n1} + M_{n2} \quad (3.65)$$

$$OVF_M = M_{nII} / M_{nI} \quad (3.66)$$

- bila baja tekan ( $f_s'$ ) belum leleh, maka diambil  $f_s'$  dan  $f_y$

- Untuk kondisi I

$$c1 = \frac{(A_s f_y) - (A_s' f_s')}{0.85 f_c' b \beta_1} \quad (3.67)$$

- Untuk kondisi II

$$c2 = \frac{A_s \{ f_y + (\epsilon_u - \epsilon_{sh}) E_{sh} \}}{0.85 f_c' b \beta_1} \quad (3.68)$$

$$M_{n1} = (A_s f_y - A_s' f_s') (d - 0.5 \beta_1 c1) + A_s' f_s' (d - d') \quad (3.69)$$

$$M_{n2} = (A_s - A_s') \{ f_y + (\epsilon_u - \epsilon_{sh}) E_{sh} \} (d - 0.5 \beta_1 c2) + A_s' \{ f_y + (\epsilon_u - \epsilon_{sh}) E_{sh} \} (d - d') \quad (3.70)$$

$$OV_{FM} = M_{n2} / M_{n1} \quad (3.71)$$

### 3.5.3 Pelat Terlentur

Karena beban yang bekerja pada pelat semuanya dilimpahkan menurut arah sisi pendek, maka suatu pelat terlentur satu arah yang menerus di atas beberapa perletakan dapat diperlakukan sebagaimana layaknya sebuah balok persegi dengan tingginya setebal pelat dan lebarnya adalah satu satuan panjang, umumnya 1 meter. Cara menyebut jumlah tulangan baja untuk pelat berbeda dengan yang digunakan untuk komponen struktur lainnya. Kecuali diameter tulangan juga disebutkan jarak spasi pusat ke pusat (p.k.p) batang tulangan.

Standar SKSNI T-15-1991-03 pasal 3.16.12 menetapkan bahwa untuk pelat lantai serta atap struktural yang hanya menggunakan tulangan pokok lentur satu arah,

selain penulangan pokok harus dipasang juga tulangan susut dan suhu dengan arah tegak lurus terhadap tulangan pokoknya. Peraturan lebih jauh menetapkan bahwa apabila digunakan tulangan baja deformasian (BJTD) mutu 300 untuk tulangan susut berlaku syarat minimum  $A_s = 0.0020 bh$ , sedangkan untuk mutu 400 berlaku syarat minimum  $A_s = 0.0018 bh$ , serta untuk mutu melebihi 400 Mpa yang diukur pada regangan leleh sebesar 0.35 %  $A_s = 0.0018 \times 400/f_y \times bh$  tetapi dalam segala hal tidak boleh kurang dari 0.0014, dimana b dan h adalah lebar satuan dan tebal plat. Jarak p.k.p tulangan pokok tidak boleh lebih dari tiga kali tebal plat atau 500 mm, sedangkan jarak tulangan susut dan suhu tidak boleh lebih dari lima kali tebal plat atau 500 mm.

Standar SKSNI T-15-1991-03 pasal 3.3.5 ayat 1 disebutkan bahwa setiap penampang dari suatu komponen struktur terlentur rasio tulangan ( $\rho$ ) min =  $1.4/f_y$ . Untuk sistem pelat dua arah lihat standar SKSNI T-15-1991-03 pasal 3.6.4 yang disebutkan bahwa luas tulangan dalam setiap arah untuk sistem pelat dua arah harus dihitung dari momen pada penampang kritis tetapi tidak boleh kurang dari yang ditentukan dalam ayat 3.16.12, jarak antar tulangan pada penampang kritis tidak boleh melebihi dua kali tebal pelat.

Untuk analisis pelat terlentur satu arah perlu diketahui dimensi unsur-unsur penampang pelat terlebih dahulu yaitu :

mutu baja tulangan ( $f_y$ ), mutu beton ( $f_c'$ ), tebal selimut/penutup beton ( $p_b$ ), diameter (D) dan jarak p.k.p tulangan, lebar pelat (b) = 1000 mm, tebal total pelat (h), tebal efektif pelat (d) dan dimensi yang dicari adalah :



$$A_s = 0.25 \pi D^2 1000/\text{jarak p.k.p (mm}^2/\text{m')} \quad (3.72)$$

$$d = h - p_b - D/2 \text{ (mm)} \quad (3.73)$$

$$\text{Rasio tulangan } (\rho) = A_s/b.d \quad (3.74)$$

Cek  $A_s$  plat yang diperlukan untuk tulangan susut dan suhu

$$A_s \text{ minimum} = 0.002 bh < A_s \quad (3.75)$$

- Untuk kondisi I

$$c_1 = \frac{A_s f_y}{0.85 f_c' b \beta_1} \quad (3.76)$$

$$M_{n1} = 0.85 f_c' b \beta_1 c_1 (d - 0.5 \beta_1 c_1) \quad (3.77)$$

- Untuk kondisi II

$$c_2 = \frac{A_s \{ f_y + (\epsilon_u - \epsilon_{sh}) E_{sh} \}}{0.85 f_c' b \beta_1} \quad (3.78)$$

$$M_{n2} = 0.85 f_c' b \beta_1 c_2 (d - 0.5 \beta_1 c_2) \quad (3.79)$$

$$OV_{FM} = M_{n2}/M_{n1} \quad (3.80)$$

